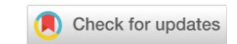
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

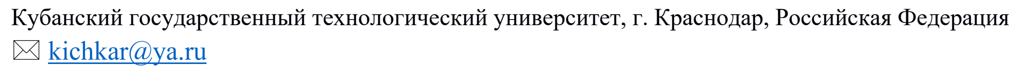
УДК 681.5:622.24
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-246-254

Оригинальное теоретическое исследование

Математическая модель движения бурового раствора по сетке вибросита


EDN: IULDLM

И.Ю. Кичкарь
Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация
✉ kichkar@ya.ru



Аннотация

Введение. При бурении нефтяных или газовых скважин порода из забоя выносится на поверхность буровым раствором, который очищается от шлама на первой стадии виброситами. Вибросита оснащаются такой сеткой и создают такие траектории виброколебаний рамы, чтобы с одной стороны — обеспечивать очистку поступающего из устья скважины бурового раствора, а с другой — обеспечивать должную степень очистки. Для корректного подбора номенклатуры сеток нужно надежно определять пропускную способность вибросита в реальных условиях. Это позволит заранее заказать требуемое количество сеток с нужным размером ячеек. Ранее исследования проводились путем просеивания смеси калиброванных гранул на стандартном вибростенде или процеживанием минерального масла через неподвижную сетку. Однако это не в полной мере соответствует реальным условиям просеивания бурового раствора. Целью данной работы было моделирование пропускной способности бурового вибросита в реальных условиях путем расчета движения бурового раствора по вибрирующей сетке с использованием её ранее полученной удельной пропускной способности.

Материалы и методы. При создании математической модели полной пропускной способности бурового вибросита использовалась известная ранее математическая модель течения жидкости в открытом канале и конечномерная аппроксимация в виде последовательности участков из сосредоточенных емкостей, соединенных гидравлическими проводимостями (по аналогии с аппроксимацией электрических длинных линий и протяженных газопроводов методом конечных элементов). Расход течения жидкости над сеткой определялся по закону Шези. При этом площадь сечения потока над сеткой для конкретного участка определялась как среднее арифметическое между начальным и конечным значением высоты бурового раствора на соответствующем участке.

Результаты исследования. Составлена цепная расчетная схема просеивания бурового раствора. На основании материального баланса разработаны математические модели определения пропускной способности и высоты бурового раствора над сеткой:

- для первого участка сетки и первой узловой точки сетки;
- для последующих участков сетки и последующих узловых точек сетки;
- для последнего участка сетки и крайней узловой точки сетки.

Получена математическая модель движения бурового раствора по сетке вибросита, которая вследствие конечномерного представления этого потока по n участкам длины сетки представляет собой систему из n интегральных уравнений, описывающих сосредоточенные емкости, и $n - 1$ алгебраических уравнений, описывающие перетоки бурового раствора между емкостями.

Обсуждение и заключение. Движение бурового раствора по длине сетки вибросита соответствует движению установившегося неравномерного потока в открытом русле. Однако в первом случае — объемный расход по длине переменный (убывающий до нуля), а во втором случае — постоянный по длине. Поэтому использование только одного дифференциального уравнения установившегося неравномерного потока в открытом русле в данном случае недостаточно.

Полученная математическая модель движения бурового раствора по сетке вибросита является математическим обоснованием для разработки моделирующей программы по определению пропускной способности вибросита для реальных условий его работы, то есть для конкретного бурового раствора, данной сетки или заданной системы приводов вибросита.

Ключевые слова: буровое вибросито, вибрирующая сетка, высота слоя раствора, материальный баланс, пропускная способность, граничные условия, узловые точки

Благодарности. Автор выражает признательность кафедре «Автоматизации производственных процессов» ФГБОУ ВО «КубГТУ» за помощь в подготовке статьи.

Для цитирования. Кичкарь И.Ю. Математическая модель движения бурового раствора по сетке вибросита. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):246–254. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-246-254

Original Theoretical Research

Mathematical Model of Drilling Mud Movement along a Shale Shaker Screen

Ilia Yu. Kichkar

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

✉ kichkar@ya.ru

Abstract

Introduction. When drilling oil or gas wells, rock from the bottomhole is brought to the surface by drilling mud, which is cleaned of sludge by shale shakers at the first stage. Shale shakers are equipped with such a screen and create such trajectories of vibration of the frame in order to solve a dual problem: on the one hand, to provide the cleaning of the drilling mud coming from the well mouth, and on the other hand — to maintain the proper degree of cleaning. To correctly select the nomenclature of screens, it is necessary to reliably determine the throughput capacity of a shale shaker in the real-time setting. This will allow you to pre-order the required number of screens with the required cell size. Previously, studies were conducted by sieving a mixture of calibrated granules on a standard shaker or by straining mineral oil through a fixed screen. However, this does not fully correspond to the actual conditions of drilling mud screening. The objective of this article was to simulate the throughput of a drilling shale shaker under real conditions by calculating the movement of drilling mud along a vibrating screen using its previously obtained specific throughput capacity.

Materials and Methods. When creating a mathematical model of the full throughput capacity of a shale shaker, a previously known mathematical model of fluid flow in an open channel and a finite-dimensional approximation in the form of a sequence of sections of concentrated containers connected by hydraulic conductivities (by analogy with the approximation of long electrical lines and extended gas pipelines by the finite element method) were used. The fluid flow rate over the screen was determined according to Chézy law. In this case, the cross-sectional area of the flow above the screen for a specific section was specified as the arithmetic mean between the initial and final values of the drilling mud height in the corresponding section.

Results. A chain calculation scheme for sieving drilling mud was compiled. Based on the material balance, mathematical models were developed for determining the throughput and height of drilling mud above the screen:

– for the first section of the screen and the first nodal point of the screen;

– for subsequent screen sections and subsequent screen nodal points;

– for the last section of the screen and the last nodal point of the screen.

A mathematical model of the drilling mud movement along the shale shaker screen has been obtained, which, due to the finite-dimensional representation of this flow along n sections of the screen length, is a system of n integral equations describing concentrated tanks, and $n – 1$ algebraic equations describing the flow of drilling mud between tanks.

Discussion and Conclusion. The movement of drilling mud along the length of the shale shaker screen corresponds to the movement of a steady uneven flow in an open channel. However, in the first case, the volume flow along the length is variable (decreasing to zero), and in the second case, it is constant along the length. Therefore, the use of only one differential equation for steady uneven flow in an open channel is not sufficient in this case. The resulting mathematical model of the drilling mud movement along the shale shaker screen is a mathematical basis for the development of a modeling program to determine the throughput of the shale shaker for real operating conditions, i.e., for a specific drilling mud, a given screen or a given drive system of the shale shaker.

Keywords: shale shaker, vibrating screen, height of the mortar layer, material balance, throughput capacity, edge condition, nodal points

Acknowledgements. The author appreciates the Production Automation Department, KubSTU, for assistance in preparing the article. The author would like to thank the reviewers for their criticism and suggestions, which contributed to a significant improvement in the quality of the article.

For Citation. Kichkar IYu. Mathematical Model of Drilling Mud Movement along a Shale Shaker Screen. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):246–254. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-246-254

Введение. Пропускная способность комплекса очистки бурового раствора от шлама циркуляционной системы буровой установки лимитируется расходом циркулирующего бурового раствора, который должен быть очищен должным образом [1]. Под пропускной способностью понимается объем бурового раствора, просеянный сквозь сетку, а в качестве расхода — объем бурового раствора, протекший без просеивания. Вибросито является первым технологическим аппаратом в этом комплексе и осуществляет грубую очистку. Поэтому его пропускная способность в основном определяет пропускную способность всей системы очистки.

Пропускная способность комплекса очистки циркуляционной системы (ЦС) стандартной буровой установки должна превышать производительность бурового насоса и составлять порядка 30–80 л/с. Недостаточная пропускная способность ЦС ограничивает скорость проходки [2].

Циркулирующий буровой раствор поступает на вибросито напрямую из устья скважины по желобу. Здесь нет промежуточных емкостей, поэтому даже если его расход кратковременно превысит пропускную способность вибросита, то буровой раствор по сетке перельется в отвал, что приведет к его потере. Если помощник бурильщика откроет шиберную заслонку, то неочищенный буровой раствор мимо сетки вибросита поступит в емкость. Это крайне нежелательный случай, так как шлам оседает в емкости, не позволяя перекачивать его насосом в пескоотделитель. Это резко снижает степень очистки бурового раствора, что приводит к увеличению затрат на бурение и даже к осложнениям в скважине [2].

Пропускная способность конкретного вибросита во многом определяется размером ячейки сетки, которой оно оснащено. С уменьшением размера ячейки существенно уменьшается пропускная способность вибросита, но повышается степень очистки бурового раствора. На практике для предотвращения пропуска раствора мимо вибросита на нем устанавливают сетку с более крупной ячейкой с большим, но неизвестным запасом по пропускной способности [1].

Реальное измерение пропускной способности вибросита затруднено, т.к. после просеивания через сетку раствор сливается в емкость под виброситом самотеком, не проходя по трубопроводу. Поэтому определение пропускной способности бурового вибросита проводилось косвенными методами.

В работе [2] на основании производственного опыта указаны параметры, изменяющие пропускную способность: увеличение длины сетки, снижение скорости потока, уменьшение угла наклона сетки, изменение направления перемещения частиц, уменьшение амплитуды колебаний сетки, одновременное использование двух последовательных или параллельных сеток. Однако авторы не приводят количественные показатели данных параметров. В работе [3] приведены значения пропускной способности бурового вибросита при работе с различными буровыми растворами, но не приводится общая формула. В[1] указывается только формула для расчета изменения пропускной способности. Задача выбора сетки для конкретного случая решена в обзоре коллектива американских инженеров[2]. Она состоит в том, чтобы выбрать сетку с наименьшей ячейкой, при которой вибросито обладало бы пропускной способностью больше заданной. Для испытаний сеток разработано несколько методов, но все они далеки от условий работы вибросит на буровых установках. Так в стандарте API Recommended practice 13C сетки испытываются или просеиванием смеси калиброванных гранул на стандартном вибростенде или процеживанием минерального масла через неподвижную сетку. В работе [4] сделана попытка на основе уравнения Навье-Стокса аналитически описать движение потока бурового раствора по сетке и процесс просеивания его через сетку. Результаты моделирования не учитывают динамические параметры грохота. Эти параметры учтены в работе [5], но в качестве исследуемого не для бурового раствора, а для угольного шлама. Количество всего удаляемого шлама от общей массы сравнительно невелико [6]. Такая концентрация шлама не оказывает заметного влияния на реологию бурового раствора [3]. Соответственно разделение процесса обезвоживания, приведенное в [7] нецелесообразно. Большая концентрация шлама наблюдается в буровом растворе, выходящего из пескоотделителей и илоотделителей, который очищается на втором вибросите[3].

[1] *American Association of Drilling Engineers Shale Shakers and Drilling Fluid System.* Houston: Gulf Publishing Company; 1999. 335 p.
[2] Там же. С. 3–335.
[3] Там же. С. 3–335.

Из всего вышесказанного следует, что определить значение пропускной способности бурового вибросита с помощью теоретических исследований пока не получалось. Поэтому целью данной работы было моделирование полной пропускной способности бурового вибросита на основании проведенных ранее лабораторных экспериментов по определению удельной пропускной способности.

Удельная пропускная способность. Коллективом с участием автора ранее была разработана методика [7], техническое и программное обеспечение для экспериментального определения математической модели удельной пропускной способности конкретной сетки первого вибросита по реальному буровому раствору для конкретного вибросита, проведены экспериментальные исследования [8]. Если у всех точек рамы сита, расположенных по линии сетки, траектории виброколебаний одинаковы, или, как говорят в вибротехнике «траектории однородны», то достаточно провести один эксперимент. Если траектории неоднородны, то достаточно провести три эксперимента при траекториях на краях и в центре сетки. В любом случае параметры виброколебаний точек рамы у производственного вибросита должны быть известны и реализованы в экспериментах.

Известны экспериментальные стенды других ученых, например, в работе [9] описан стенд, который создает полигармонические траектории колебаний. Это достигается соответствующей компоновкой системы привода с кратной частотной вращения. В ходе экспериментов получены даже фигуры Лиссажу [10]. Полученная наилучшая конструкция может работать менее эффективно за счет внешних воздействий. При этом целью автоматического управления является компенсация негативного влияния внешних воздействий. В работе [11] приведен способ управления, в [12] — динамические параметры вибросита в ходе управления, а в [13] приведен пример пошаговой оптимизации с помощью комплексов моделирования Adams и Nastran.

Проведенные эксперименты по просеиванию воднобентонитового раствора плотностью 1,19 г/см^3 через образец сетки с квадратными ячейками размером 0,4×0,4 мм позволили получить следующую математическую модель удельной пропускной способности сетки [9]

$$q(h, Ay) = 0{,}0088 \cdot h^{1,62} \cdot Ay^{1,59}, \quad (1)$$

где $q(h, Ay)$ — удельная пропускная способность сетки, м^3/м^{2}с; h — высота слоя бутового раствора на сетке, м; Ay — амплитуда вертикального виброускорения, м/с^2.

Граничные условия процесса просеивания

Наличие математической модели удельной пропускной способности недостаточно для определения пропускной способности бурового вибросита. Необходимо также знание распределения высоты слоя бурового раствора по длине сетки $h(x)$ при известном расходе раствора, поступающего на сетку сита $Q(0)$. Принять в первом приближении линейное распределение высоты по длине сетки не представляется возможным, так как неизвестно граничное условие в конце процесса просеивания $h(0)$ Граничное условие начала процесса просеивания, как было описано ранее, известно и имеет вид $h(0{,}8 \cdot L) = 0$, где L — длина сетки, м.

В классической гидравлике известна математическая модель распределения высоты слоя жидкости по длине потока при безнапорном установившемся неравномерном течении жидкости в открытом канале [14]. Однако расход жидкости в этом случае постоянен по длине потока, а в нашем случае расход уменьшается вследствие просеивания части бурового раствора. Следовательно, установившееся движение потока бурового раствора по сетке вибросита представляет собой объект с распределенными по длине сетки переменными $h(x)$ и $Q(x)$.

Методы расчета распределенных объектов

Поиск инженерных решений подобных задач показал, что в электротехнике электрические длинные линии заменяют цепочкой сосредоточенных сопротивлений, емкостей и индуктивностей [15]. Протяженные газопроводы для моделирования их работы заменяют цепочкой перемежающихся емкостей и гидравлических сопротивлений [16]. Особенно часто подобный подход используется в динамике машин, где по чертежам общих видов строятся цепные расчетные схемы, состоящие из перемежающихся сосредоточенных масс или моментов инерции и сосредоточенных податливостей для вибрационных машин [17] и систем управления [18]. Это по сути является конечно-элементной аппроксимацией распределенных объектов.

Построение математической модели полной пропускной способности бурового вибросита

Построим расчетную схему потока бурового раствора из сосредоточенных емкостей и сосредоточенных гидравлических проводимостей, приведенную на рис. 1. Для этого разобьем длину сетки вибросита узловыми точками на равные участки длиной $\Delta x = L/m$, где m — число участков. Узловые точки обязательно должны стоять в начале и в конце сетки. В узловые точки поместим сосредоточенные емкости. Начальной и конечной емкости соответствует участок потока длиной $0{,}5 \cdot \Delta x$, остальным емкостям — Δx.

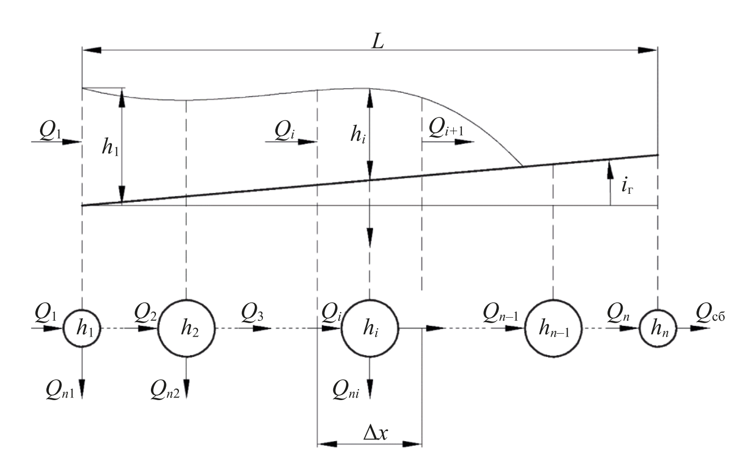


Рис. 1. Цепная расчетная схема гидравлической системы движения потока бурового раствора по сетке

Уравнение материального баланса для первой емкости на рис. 1 имеет вид:

$$\left(Q_1(t)-Q_2(t)-Q_{n1}(t)\right)\cdot dt=\frac{\Delta x}{2}\cdot b\cdot dh_1(t), \quad (2)$$

где $Q_1(t)$ — расход бурового раствора, поступающий на вибросито, м^3/с; $Q_2(t)$ — расход бурового раствора, вытекающий сетке из емкости 1-й узловой точки в емкость 2-й узловой точки, м^3/с; $Q_{n1}(t)$ — расход бурового раствора, просеянный на первом участке, м^3/с; $h_1(t)$ — высота слоя раствора в первой узловой точке, м; b — ширина сетки, м.

Просеянный расход в первой узловой точке с учетом удельной пропускной способности равен:

$$Q_{n1}(t)=q\left(h_1(t),Ay_1\right)\cdot\frac{\Delta x}{2}\cdot b, \quad (3)$$

где Ay_1 — амплитуда виброускорения в первой узловой точке.

Подставив выражение (3) в (2) и преобразовав уравнение, получим выражение для $h_1(t)$:

$$h_1(t)=\int\left[\frac{2}{\Delta x\cdot b}Q_1(t)-Q_2(t)-q\left(h_1(t),Ay_1\right)\right]\cdot dt. \quad (4)$$

Уравнение материального баланса для емкостей всех промежуточных узловых точек на рис. 1 имеет вид:

$$\left(Q_i(t)-Q_{i+1}(t)-Q_{ni}(t)\right)\cdot dt=\Delta x\cdot b\cdot dh_i(t), \quad (5)$$

где $Q_i(t)$ — расход бурового раствора, втекающий в емкость i-той узловой точки, м^3/с; $Q_{i+1}(t)$ — расход бурового раствора, вытекающий по сетке из емкости i-й узловой точки в емкость $i+1$-й узловой точки, м^3/с; $Q_{ni}(t)=q(h_i(t), Ay)\cdot\Delta x\cdot b$ — расход бурового раствора, просеянный на i-ом участке, м^3/с; $h_i(t)$ — высота слоя раствора в i-ой узловой точке, м.

Преобразовав уравнение (5), получим выражение для $h_i(t)$ всех промежуточных узловых точек:

$$h_i(t)=\int\left[\frac{1}{\Delta x\cdot b}\left(Q_i(t)-Q_{i+1}(t)\right)-q\left(h_i(t),Ay_i\right)\right]\cdot dt. \quad (6)$$

В последней узловой точке исходя из физических соображений примем высоту слоя раствора нулевой (С), чтобы не подпирать поток в случае течения его в отвал. Это по сути — правое граничное условие для высоты слоя раствора. Расход бурового раствора, поступающий на вибросито, в данной математической модели принят постоянным и равным заданной величине $Q_1(t)=Q_{1\,зад}$. Это косвенное задание левого граничного условия для высоты слоя раствора.

Все промежуточные расходы $Q_i(t)$ на рис. 1 определяются перепадом высот слоя раствора $h_{i-1}(t)-h_i(t)$ и сосредоточенным гидравлическим сопротивлением участка сетки. Буровой раствор является неньютоновской жидкостью, но при турбулентном течении глинистых растворов можно исходить из обычных формул гидравлики [19].

Для определения расхода $Q_i(t)$ не будем определять величину гидравлического сопротивления участка сетки длиной Δx, а воспользуемся известным дифференциальным уравнением установившегося неравномерного потока постоянного расхода [20], но для поднятой сетки:

$$\frac{dh(x)}{dx}=-\left(i_г+\frac{Q^2}{F^2\cdot C^2\cdot R}\right)\Big/\left(1-\frac{\alpha}{g}\cdot\frac{Q^2}{F^2}\cdot b\right), \quad (7)$$

где $i_г$ — геометрический уклон русла потока, на рисунке 1 $i_г>0\, i_г>0$; F — площадь поперечного сечения потока, м^2; C — коэффициент Шези; R — гидравлический радиус сечения потока, м; α — коэффициент Кориолиса, α = 1,10 – 1,15 [21]; g — ускорение свободного падения.

Выразим в дифференциальном уравнении (7) производную конечными разностями и подставим в него переменные из расчетной схемы на рис. 1:

$$\frac{h_{i-1}(t)-h_i(t)}{\Delta x}=-\frac{i_{\text{г}}+\dfrac{Q_i^2(t)}{F_i^2\cdot C^2\cdot R_i}}{1-\dfrac{\alpha}{g}\cdot\dfrac{Q_i^2(t)}{F_i^3}\cdot b}, \qquad (8)$$

где F_i — площадь поперечного сечения потока на участке от i – 1-ой узловой точки до i-ой узловой точки.

Здесь следует уточнить, что $Q_i(t)$ — это расход на участке от i – 1-ой узловой точки до i-ой узловой точки. Площадь поперечного сечения потока на этом участке изменяется от величины $h_{i-1}(t)\ b$ до величины $h_i(t)\ b$. Поэтому величину F_i будем определять как среднее значение этих площадей:

$$F_i=b\cdot\frac{h_{i-1}(t)+h_i(t)}{2}. \qquad (9)$$

Величина гидравлического радиуса потока равна отношению [15]:

$$R_i=\frac{F_i}{A_i}=b\cdot\frac{h_{i-1}(t)+h_i(t)}{2}\cdot\frac{1}{b+2\cdot\dfrac{h_{i-1}(t)+h_i(t)}{2}}, \qquad (10)$$

где A_i — длина смоченного периметра потока на участке от i – 1-ой узловой точки до i-ой узловой точки, м.

Ширина сетки промышленных вибросит — от 1 метра, толщина слоя раствора на сетке — несколько сантиметров [4]. Поэтому из выражения (10) следует, что $R_i \approx (h_{i-1}(t) + h_i(t))/2$. Подставив это значение и значение F_i из выражения (9), получим:

$$\frac{h_{i-1}(t)-h_i(t)}{\Delta x}=-\frac{i_{\text{г}}+\dfrac{Q_i^2(t)}{\left(0{,}5\cdot\left(h_{i-1}(t)+h_i(t)\right)\right)^3\cdot b^2\cdot C^2}}{1-\dfrac{\alpha}{g}\cdot\dfrac{Q_i^2(t)}{\left(0{,}5\cdot\left(h_{i-1}(t)+h_i(t)\right)\right)^3\cdot b^2}}. \qquad (11)$$

Разрешим уравнение (11) относительно $Q_i(t)$ для $i > 1$:

$$Q_i(t)=\sqrt{\frac{\dfrac{h_{i-1}(t)-h_i(t)}{\Delta x}+i_{\text{г}}}{\left[\dfrac{h_{i-1}(t)-h_i(t)}{\Delta x}\cdot\dfrac{\alpha}{g}-\dfrac{1}{C^2}\right]}\cdot\left[0{,}5\cdot\left(h_{i-1}(t)+h_i(t)\right)\right]^3\cdot b^2}. \qquad (1)$$

Обсуждение и заключение. Математическая модель течения бурового раствора по сетке вибросита представляет собой систему из n уравнений (6) и n – 1уравнений (12).

Начальные условия для переменных $h_i(0)$ принять нулевыми нельзя, так как это приведет к делению на ноль в уравнениях (12). Поэтому рекомендуется принять эти условия ненулевыми, но достаточно малыми, например, $h_i(0) = 0{,}0001$.

Моделирование системы уравнений (6) и (12) можно производить в моделирующих средах, например, MATLAB с приложением Simulink или SimInTech. В любом случае надо определиться с количеством узловых точек цепной расчетной схемы на рис. 1. Пропускная способность вибросита, оснащенного конкретной сеткой, равна расходу $Q_{1\ \text{зад}}$, при котором последние 20–25 % длины сетки были бы свободны от бурового раствора и использовались для обезвоживания шлама[4]. Поэтому предпоследняя узловая точка при минимальном количестве этих точек должна находится на таком же расстоянии от края сетки. Отсюда следует $\Delta x \approx 0{,}15 \cdot L$, чему соответствует семь узловых точек.

В этой работе стояла задача определения установившегося движения потока бурового раствора, а точнее его профиля. Переходный процесс этого движения автор вынужден был использовать, так как невозможно было установить левое граничное условие $h_1(\infty)$, вместо которого использовано косвенное задание этого граничного условия $Q_1(t) = Q_{1\ \text{зад}}$. Окончательное количество узловых точек определится только в процессе моделирования по показателю точности профиля бурового раствора. Для этого производят моделирование математической модели (6) и (12) с n и n + 1 узловыми точками. Если наибольшая разность профилей потока превосходит, например, 5 % от значения высоты слоя раствора в этой точке, то увеличивают число узловых точек на единицу до n + 2 [22]. Затем производят моделирование с n + 2-ми узловыми точками и сравнивают профили

[4] *American Association of Drilling Engineers Shale Shakers and Drilling Fluid System.* Houston: Gulf Publishing Company; 1999. 335 p.

потока этого моделирования с результатом предыдущего моделирования с $n + 1$ точками. По достижению заданной погрешности в дальнейшем используют математическую модель с последним значением количества узловых точек.

Полученная математическая модель движения потока бурового раствора по сетке вибросита совместно с ранее полученной математической моделью удельной пропускной способности сетки по конкретному буровому раствору [8] позволяет обоснованно рекомендовать установку сетки с определенными размерами ячеек для различных расходов бурового раствора, истекающего из устья скважины.

Список литературы / References

1. Плетнев Н.С., Семенов Н.В. Анализ типовых конструкций вибрационных сит и особенностей их эксплуатации. В: *Материалы Всероссийской конференции с международным участием с элементами научной школы «Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии»*. Томск: Издательство ТПУ; 2015. С. 632–635. URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/18336/1/conference_tpu-2015-C109-118.pdf (дата обращения: 29.04.2024).

Pletnev NS, Semenov NV. Analysis of Standard Designs of Vibrating Screens and Features of Their Operation. In: *Proc. All-Russian Conference with International Participation with Elements of a Scientific School "Modern Problems of Hydrogeology, Engineering Geology and Hydrogeoecology of Eurasia"*. Tomsk: TPU Publ.; 2015. P. 632–635. (In Russ.) URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/18336/1/conference_tpu-2015-C109-118.pdf (accessed: 29.04.2024).

2. Булатов А.И., Проселков Ю.М., Шаманов С.А. *Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин*. Москва: Недра; 2003. 1007 с. URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-bulatov-ai-proselkov-yum-shamanov-sa-tehnika-i-tehnologiya-bureniya-neftyanyh-i-.pdf (дата обращения: 20.05.2024).

Bulatov AI, Proselkov YuM, Shamanov SA. *Drilling Technique and Engineering of Oil and Gas Wells*. Moscow: Nedra; 2003. 1007 p. (In Russ.) URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-bulatov-ai-proselkov-yum-shamanov-sa-tehnika-i-tehnologiya-bureniya-neftyanyh-i-.pdf (accessed: 20.05.2024).

3. Рязанов А.Я. *Энциклопедия по буровым растворам*. Оренбург: Летопись; 2004. 664 с. URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-enciklopediyapoburovymrastvoram.pdf?ysclid=lwyzjxbik6960660361 (дата обращения: 20.05.20204).

Ryazanov AYa. *Encyclopedia of Drilling Fluids*. Orenburg: Letopis'; 2004. 664 p. (In Russ.) URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01002873248 (accessed: 20.05.2024).

4. Сансиев В.Г. Гидродинамические основы процесса ситовой очистки бурового раствора. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* 2009;75(3):41–46.

Sansiev VG. Hydrodynamic Principles of the Drilling Mud Screening Process. *Oil and Gas Studies.* 2009;75(3):41–46.

5. Сансиев В.Г. Моделирование процессов классификации и обезвоживания угольного шлама на сите грохота. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2013;(7):325–335.

Sansiev VG. Modeling of Coal Sludge Classification and Dehydration Processes on Screen. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2013;(7):325–335.

6. Головин М.В., Добик А.А., Кортунов А.В., Мищенко В.И. Современные тенденции развития вибросит для очистки буровых растворов. *Бурение и нефть.* 2014;(3):50–52. URL: https://burneft.ru/archive/issues/2014-03/14 (дата обращения: 20.05.2024).

Golovin MV, Dobik AA, Kortunov AV, Mishchenko VI. Modern Development Trends of Shale Shakers for Drilling Mud Cleaning. *Drilling and Oil*. 2014;(3):50–52. URL: https://burneft.ru/archive/issues/2014-03/14 (accessed: 20.05.2024).

7. Кичкарь Ю.Е., Кичкарь И.Ю., Миллер А.С. *Способ определения удельной пропускной способности сеток вибросит*. Патент РФ, № 2379127 С 1. 2010. 8 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2379127C1_20100120.pdf (дата обращения: 20.05.2024).

Kichkar YuE, Kichkar IYu, Miller AS. *Estimation of Vibration Screens Nets Specific through Capacity*. RF Patent No. 2379127 C 1. 2010. 8 p. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2379127C1_20100120.pdf (accessed: 20.05.2024).

8. Кичкарь Ю.Е., Кичкарь И.Ю. Исследование влияния параметров колебаний рамы на удельную пропускную способность вибросита. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности.* 2017;(8):37–40.

Kichkar YuE, Kichkar IYu. A Study of the Frame Vibration Parameters Influence on a Vibrating Screen Specific Capacity. *Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry.* 2017;(8):37–40.

9. Penagos HP, Gantiva ME, López JAA. Detection of Failures in the Operation of Shale Shaker Machines for the Separation of Solids In: *Proc. 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME).* New York City: IEEE; 2023. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/ICECCME57830.2023.10253357

10. Zhipeng Lyu, Sizhu Zhou. Design of Spatial Lissajous Trajectory Vibrating Screen. In book: Jianrong Tan (ed). *Advances in Mechanical Design*. Singapore: Springer; 2020. P. 493–498. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9941-2_40

11. Кичкарь И.Ю., Кичкарь Ю.Е., Посмитная Л.А. *Способ управления системой приводов вибросита.* Патент РФ, № 2649203. 2018. 14 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2649203C1_20180330.pdf (дата обращения: 20.05.2024).

Kichkar YuE, Kichkar IYu, Posmitnaya LA. *Method of Vibrating Sieve Drives System Control.* RF Patent No. 2649203. 2018. 14 p. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2649203C1_20180330.pdf (accessed: 20.05.2024).

12. Osadolor AO, Bashir ME, Osifo TI. Development and Evaluation of a Small-Scale Shale Screening Machine. *Nigerian Journal of Scientific Research.* 2022;21(1):72–78.

13. Korostelkin AA, Filintsev AA, Novokshonov VV, Nikitin AV. On Shale Shaker's Structural Optimization and Performance Improvement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020;986(1):012058. https://doi.org/10.1088/1757-899X/986/1/012058

14. Калинин А.В. Зависимость коэффициента Шези от числа Фруда. *Вестник науки и образования Северо-Запада России.* 2019;5(3):38–56.

Kalinin AV. Dependence of the Chézy Coefficient from Froud Number. *Journal of Science and Education of North-West of Russia*. 2019;5(3):38–56.

15. Васильева Т.Н., Аронов Л.В. Математическая модель режимов работы распределительной электрической сети значительной протяженности. *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева.* 2012;14(2):51–54. URL: https://vestnik.rgatu.ru/archive/2_2012.pdf?ysclid=lwz0apyfjj690751007 (дата обращения: 20.05.2024).

Vasileva TN, Aronov LV. The Mathematical Model of the Long-Distance Transmission Circuits Operating Regimes. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev.* 2012;14(2):51–54. URL: https://vestnik.rgatu.ru/archive/2_2012.pdf?ysclid=lwz0apyfjj690751007 (accessed: 20.05.2024).

16. Мешалкин В.П., Чионов А.М. Компьютерное моделирование протяженных многослойно изолированных подводных газопроводов высокого давления. *Математическое моделирование.* 2017;29(8):110–122. URL: https://www.mathnet.ru/links/b0a80e5d714ee1ef962f28050fffa21f/mm3880.pdf (дата обращения: 20.05.2024).

Meshalkin VP, Chionov AM. Computer Modeling of the Long Multilayer-Insulated High-Pressure Subsea Gas Pipeline. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2017;29(8):110–122. URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=3880&option_lang=eng (accessed: 20.05.2024).

17. Блехман И.И. *Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника.* Санкт-Петербург; Издательский дом «Руда и металлы»: 2013. 640 с.

Blekhman II. *Theory of Vibration Processes and Devices. Vibration Mechanics and Vibration Engineering*. St. Petersburg: Publ. House "Ruda i metally"; 2013. 640 p. (In Russ.)

18. Куликов В.О., Брейдо И.В. Пропуск резонансных частот вибрационного грохота с использованием преобразователя частоты Mitsubishi Electric FR серии A800. *Наука настоящего и будущего.* 2019;1:222–226. URL: http://elib.kstu.kz/fulltext/temat/2019/elibrary_41177383_25140206.pdf (дата обращения: 20.05.2024).

Kulikov VO, Breido IV. Skipping Resonant Frequencies of Vibrating Screen Using Mitsubishi Electric FR A800 Series Frequency Converter. *Science: Present and Future*. 2019;1:222–226. (In Russ.) URL: http://elib.kstu.kz/fulltext/temat/2019/elibrary_41177383_25140206.pdf (accessed: 20.05.2024).

19. Булатов А.И. Системный анализ исследований течения вязко-пластичных жидкостей – глинистых и цементных растворов (ч. 1). *Бурение и нефть*. 2016;(3):18–23. URL: https://burneft.ru/archive/issues/2016-03/18 (дата обращения: 20.05.2024).

Bulatov AI. System Analysis of Current Research Visco-Plastic Liquids – Clay and Cement Mortars (Part 1). *Drilling and Oil*. 2016;(3):18–23. URL: https://burneft.ru/archive/issues/2016-03/18 (accessed: 20.05.2024).

20. Байгалиев Б.Е., Гортышов Ю.Ф., Самойленко А.В. Исследование влияния откосов на гидравлические сопротивления трапецеидальных русел. *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева.* 2012;(2):35–43.

Baigaliev BE, Gortyshov YuF, Samoilenko AV. Investigation of the Slope Influence on Hydraulic Resistances of Trapezoidal Channels. *Vestnik of Tupolev KNRTU*. 2012;(2):35–43.

21. Абдюкова Р.Я., Хабибуллин М.Я. Расчет геометрических размеров клапана бурового насоса и определение высоты подъема тарели. *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса.* 2015;(5):15–18.

Abdyukova RYa, Habibullin MYa. Calculation of Geometric Dimensions of a Mud Pump Valve and Determination of the Plate Lifting Height. *Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*. 2015;(5):15–18.

22. Меретуков З.А., Заславец А.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Методы решения дифференциальных уравнений гидродинамики. *Новые технологии.* 2012;(1):36–41.

Meretukov ZA, Zaslavets AA, Koshevoi EP, Kosachev VS. Methods of Solving Differential Equations of Hydrodynamics. *New Technologies*. 2012;(1):36–41.

Об авторе:

Илья Юрьевич Кичкарь, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов института компьютерных систем и информационной безопасности Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), SPIN-код, ORCID, ResearcherID, kichkar@ya.ru

Конфликт интересов: **автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Ilia Yu. Kichkar, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Production Automation Department, Institute of Computer Systems and Information Security, Kuban State Technological University (2, Moskovskaya Str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ResearcherID, kichkar@ya.ru

Conflict of Interest Statement: **the author claimed no conflict of interest.**

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 27.05.2024
Поступила после рецензирования / Reviewed 19.06.2024
Принята к публикации / Accepted 28.06.2024